

Talaj és kőzet közötti átmeneti anyagok szilárdsága a pernyezagy vizsgálatok tükrében

Bán Zoltán

BME Építőmérnöki Kar, ban.zoltan9@gmail.com

Nagy László

BME Geotechnikai Tanszék, lacinagy@mail.bme.hu

Török Ákos

BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A cikk bemutatja a széntüzelésű erőművek melléktermékeként keletkező pernyezagy, illetve az ebből készülő zagyálatok szilárdsági viszonyait. Laborvizsgálatok részeként nyomó-, illetve húzókísérleteket végeztünk zagyolt technológiával készült gáttestből származó magmintákon. A pernyezagy szilárdsága a kemény talajok és a puha kőzetek közé esik, ezért összehasonlító méréseket végeztünk, az egyik legelterjedtebb ilyen jellegű hazai kőzettel, a kiscelli agyaggal.

Kulcsszavak: pernyezagy, egyirányú nyomószilárdság, közvetett húzószilárdság

1 BEVEZETÉS

Az ajkai vörösiszap katasztrófa ismételten rávilágított arra, hogy a különböző bányászati, illetve ipari tevékenységekből származó zagyok mekkora veszélyt jelenthetnek a környezetre. Az elmúlt évtizedekben több – nem egy a magyarországinál súlyosabb következményekkel járó – hasonló katasztrófa is bekövetkezett világszerte, bizonyítván, hogy az ajkai gátszakadás nem tekinthető elszigetelt esetnek (Nagy 2011).

A zagyolt gátépítés technológiájának köszönhetően gyakran előfordul, hogy a tározókat határoló rézsűk is valamilyen más zagyból készülnek, ahogy az ajkai tározónál is történt. Emiatt kiemelkedően fontos a zagyok szilárdsági jellemzőinek ismerete, amelyek döntő jelentőséggel bírnak a stabilitási kérdésekben. A pernyezagyot gyakran használják tározóépítésre, ugyanis a magas szabad mésztartalmú pernyék – a pernye a szén hamutartalmának azon finomszemcséjű része, ami a füstgázokkal együtt távozik a kazánból – hidraulikus kötőanyagként viselkednek, azaz víz jelenlétében jelentős szilárdság növekedés tapasztalható.

A pernyezagy szilárdsága a kemény talajokkal és a puha kőzetekkel mérhető össze, ezért a természetben előforduló anyagok közül a kiscelli agyag látszott a legmegfelelőbb összehasonlítási alapnak. Ezért a pernyezagyhoz hasonló kőzetfizikai mérések készültek a kiscelli agyag próbatesteken. A két mérési sor adatait összevetve kaptuk meg a pernyezagy viselkedésére jellemző paramétereket, amelyek gát állékonysági számításoknál közvetlenül felhasználhatók.

2 SZILÁRDSÁGI-ALAKVÁLTOZÁSI JELLEMZŐK

A laboratóriumi méréskehez használt pernyezagy magminták egy zagyolt technológiával, nagyjából 20 évvel ezelőtt épült gáttestből származtak. A megszilárdult zagy könnyen töredező, réteges szerkezetének (1. ábra) köszönhetően nem lehetett triaxiális vizsgálatához szükséges méretű mintákat kifúrni, így a kézzel kialakított próbatesteken egyirányú nyomó-, illetve közvetett (brazil) húzókísérletek készültek. A réteges és heterogén szerkezet a zagyolt gátépítés technológiájára és a tüzelőanyag változására vezethető vissza. A mérések a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában készültek.

A 29 pernyezagy magminta nem volt teljesen zavartalannak tekinthető, mivel a próbatestek palástja mentén egy pár mm-es kéreg alakult ki, amelyet a feltáró fúrás közben keletkező feldolgozott (iszapos) anyag alkot. Ez a kéreg terhelés hatására gyakran levált, lerepedezett.

A magmintákból kialakított próbatesteken összesen 12 nyomó-, illetve 17 húzóvizsgálatot készült. A mérési eredmények igen széles spektrumon mozogtak: a nyomószilárdság 70 kPa-tól, egészen 2700 kPa-ig terjedt, míg a rugalmassági modulus 1,5 MPa-tól 110 MPa-ig változott. A legmagasabb érték azonban nagyon kiugrónak bizonyult, mivel a második legnagyobb szilárdságot elérő minta 710 kPa-nál ment tönkre. A kiugró érték kivételével a mérések feszültség-alakváltozás görbéit a 2. ábra szemlélteti.



1. ábra. A megszilárdult pernyezagy réteges, heterogén szerkezete

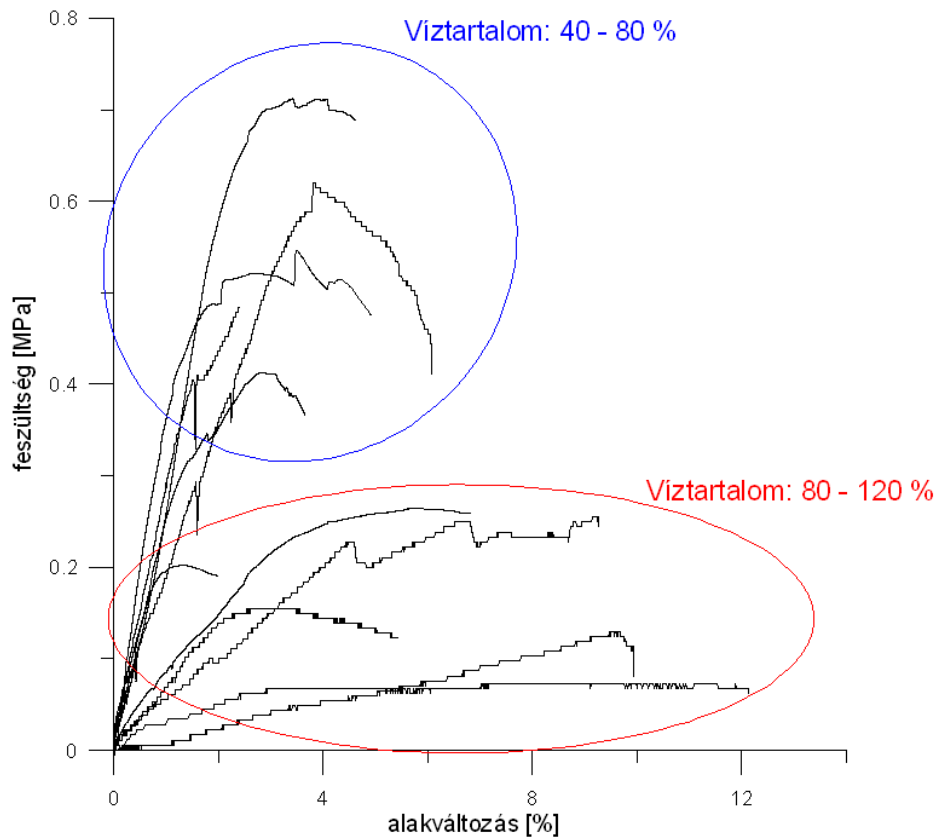
A minták víztartalma mellett, hogy igen magas volt, szintén nagy szórást mutatott, ugyanis 43%-tól egészen 115%-ig terjedtek az eredmények. A terhelés közben mért feszültség-alakváltozás (σ - ϵ) görbék alapján megfigyelhető, hogy a nagyobb szilárdságú és rugalmassági modulusú minták 40-80% közötti víztartalommal, míg az alacsonyabb szilárdságú és rugalmassági modulusú minták 80-120% közötti víztartalommal rendelkeztek (2. ábra). Összességében tehát az alacsonyabb víztartalommal rendelkező minták nagyobb szilárdsággal rendelkeztek, mint a magas víztartalmúak. A pernyezagy közvetett húzószilárdsága is széles skálán változott: 10 kPa-tól egészen 580 kPa-ig.

Mivel a víztartalom és a minták telítettsége között nem figyelhető meg kapcsolat – a telítettség minden esetben 90-100% körüli, azaz a minták kvázi-telítettek – ezért a víztartalom és a nyomószilárdság közötti összefüggés az anyag összetételére, illetve tömörségére vezethető vissza.

Két próbatesten is megfigyelhető volt fekete, valószínűleg el nem égett szén szemcsék jelenléte. A szerves anyag igen kedvezőtlenül befolyásolta a minták szilárdságát és rugalmassági modulusát, ugyanis ez a két minta rendelkezett a legalacsonyabb értékekkel.

A 90-es évek közepén a BME Mérnökgeológia Tanszékén szintén vizsgáltak különböző hőerőművekből származó pernyezagy mintákat. A Tatabányai Erőműből származó filterpernyesűrűzagy nyomószilárdsága 2-2,5 MPa között változott (Kopecskó és Kleb 1997). Ezek a mérések közvetlenül a hőerőműből származó teljesen homogén mintákon készültek, ennek is köszönhető ez a

viszonylag nagy szilárdság. Ezzel szemben az általunk vizsgált minták már jóval korábban, egy több év alatt épült, különböző rétegből álló heterogén gáttestből származtak.



2. ábra. A pernyezagy feszültség - alakváltozás görbéinek kapcsolata a víztartalommal

3 TALAJ ÉS KÖZET KÖZÖTTI ÁTMENET

A megszilárdult pernyezagy egyedi szilárdsági jellemzői felvetik a kérdést, hogy mennyiben hasonlóak és eltérőek ezek a tulajdonságok a kemény agyagokéhoz képest. Ennek kiderítésére a pernye mellett kiscelli agyagot is vizsgáltunk.

Mivel a talajok és a kőzetek közti határ meghúzására nem létezik egyértelmű mérőszám, ezért több szerző is szilárdságuk alapján próbálta kategorizálni ezeket az anyagokat. Ezekből a 3. és a 4. ábra mutat be egy-két példát.

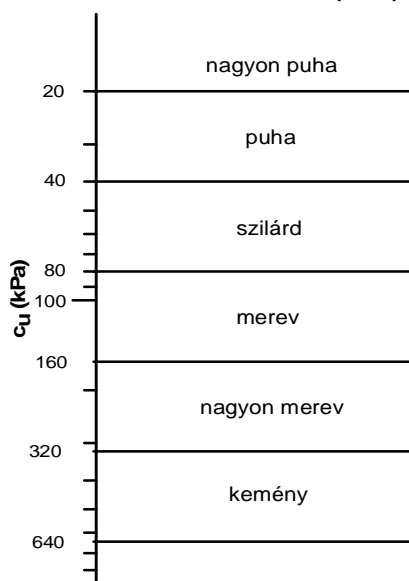
Hawkins és Pinches (1992) a talajokat drénezetlen nyírószilárdságuk (c_u), míg a kőzeteket egyirányú nyomószilárdságuk (q_u) alapján osztályozta. Eszerint azokat az anyagokat, amelyek nyírószilárdsága meghaladja a 640 kPa-t kőzetként kell besorolni. Az 1,25 MPa alatti nyomószilárdságú mintákat pedig talajként kell kategorizálni. Ezeket figyelembe véve a pernyezagy a kemény talajokhoz áll közelebb. Egyedül a kiugró szilárdságú minta érte el a gyenge kőzetek intervallumát. Ugyanakkor Hawkins és Pinches (1992) táblázata nem ad útmutatást arra az esetre, ha a minta drénezetlen nyírószilárdsága meghaladja a 640 kPa-t, az egyirányú nyomószilárdsága viszont nem éri el az 1,25 MPa-t. Ez is jelzi, hogy ezeknek az átmeneti anyagoknak a besorolása és vizsgálata mennyi nehézséget rejt magában.

Az Eurocode a 340 kPa-nál nagyobb nyírószilárdságú anyagokat javasolja gyenge kőzetnek tekinteni, és ezeket az ISO 14689-1 szerint leírni.

Az összehasonlítás céljából vizsgált kiscelli agyagminták a Solymáron található agyagbányából származnak (mintavétel: 2011. árpilis 12.). Az elhozott agyagtömbökből 6 próbatestet sikerült kifúrni, amelyekből 3 húzó- és 3 nyomókísérlet készült. A vizsgálati eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

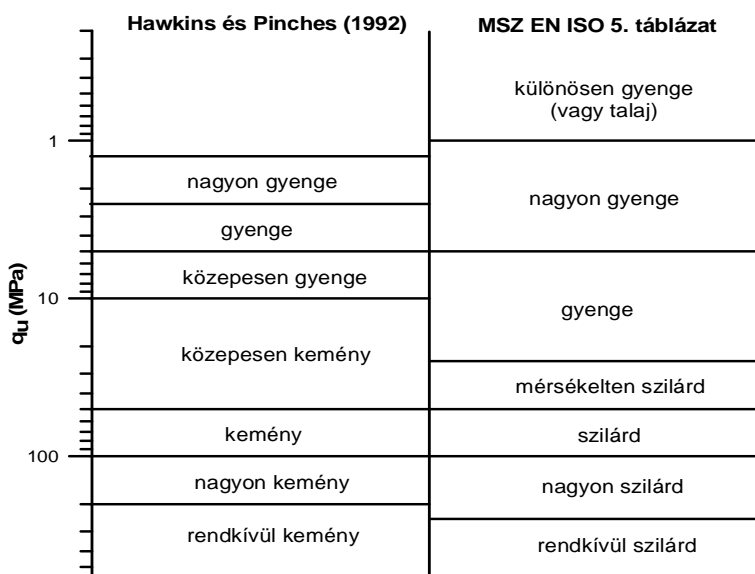
Talajok osztályozása

Hawkins és Pinches (1992)



3. ábra. Talajok drénezetlen nyírószilárdság alapján történő megnevezése

Közetek osztályozása

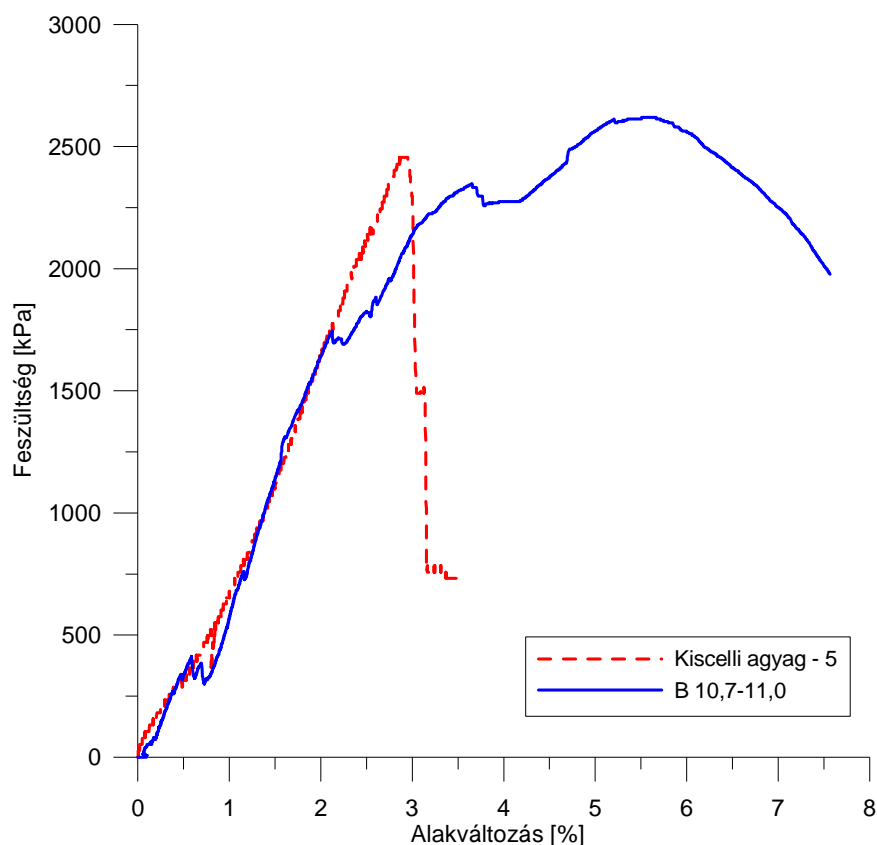


4. ábra. Közetek osztályozása egyirányú nyomószilárdságuk szerint Hawkins és Pinches (1992), illetve az MSZ EN ISO 5. táblázata alapján

1. Táblázat. A Solymárról származó szürke kiscelli agyag vizsgálati eredményei

Minta	Törőteher [kN]	Húzás/Nyomás	Törőfeszültség [MPa]	E [MPa]	ρ_n [g/cm ³]
1	1,78	Húzás	0,52	-	2,29
2	1,01	Húzás	0,44	-	2,26
3	1,07	Húzás	0,33	-	2,29
4	1,78	Nyomás	0,79	44,76	2,30
5	5,58	Nyomás	2,45	97,02	2,31
6	5,20	Nyomás	2,30	260,4	2,34

A kapott eredmények és Görög (2006, 2007a) alapján a pernyezagy szilárdsága a sárga kiscelli agyaggal, míg rugalmassági modulusa a szürke kiscelli agyag gyengébb tagjaival állítható párhuzamba. A kiugró teherbírású próbatest ezzel szemben mind szilárdsága alapján mind rugalmassági modulusát tekintve egyenértékű a szürke kiscelli agyaggal, de a budai márgánál kisebb szilárdsági paraméterekkel bír Görög (2007b). Lényeges eltérés mutatkozik azonban a kétféle anyag tönkremeneteli mechanizmusa között. A $\sigma - \varepsilon$ görbék futása is jól szemlélteti, hogy míg a kiscelli agyag merev viselkedést mutat – ez az agyag szárazabb mivoltának köszönhető –, addig a pernyénél a tönkremenetel fokozatosan, plasztikus töréssel következik be (5. ábra). Ezt a következtetést a minták törésképe is alátámasztja (6. ábra).



5. ábra. Egy kiscelli agyag és egy pernyezagy (B 10,7-11,0) minta feszültség-alakváltozás grafikonja

A törési elméletek közül a talajmechanika a Mohr-Coulomb féle törési feltételt alkalmazza legszélesebb körben. Az elmélet legfontosabb paraméterei a belső súrlódási szög (φ) és a kohézió (c). E tényezők meghatározására a triaxiális vizsgálat a legelterjedtebb, az anyag állapota azonban nem tette lehetővé a vizsgálat elvégzését. Ugyanazon talajon végzett egyirányú nyomó- és húzóvizsgálatok esetén a Mohr-féle feszültségi körök megrajzolásával azonban lehetőség nyílik a nyírószilárdsági paraméterek meghatározására. A nagy szórás miatt a $\sigma - \varepsilon$ görbéknél tapasztalt összefüggés alapján két csoportra bontottuk a mintákat, két egymástól lényegesen eltérő anyagként kezelve. A kisebb víztartalmú csoport átlagos nyomószilárdságára 550 kPa, míg átlagos húzószilárdságára 150 kPa adódott, míg a nagyobb víztartalmú csoportnál ezek az értékek 180 kPa és 70 kPa. A Mohr-köröket megrajzolva az első anyag paraméterei: $\varphi = 34^\circ$, $c = 137$ kPa voltak, míg a második anyagé: $\varphi = 26^\circ$, $c = 54$ kPa. Egy korábbi tanulmány $\varphi = 40^\circ$, $c = 108$ kPa-os nyírószilárdsági paramétereket határozott meg erre az anyagra. A szürke kiscelli agyag átlagos súrlódási szöge 25° , kohéziója pedig 211 kPa, míg a sárga kiscelli agyag átlagértékei 22° , illetve 54 kPa (Görög 2007a).

A pernyezagyra kapott eredmények alapján egy egyszerű lejtő állékonysági vizsgálata is elkészült a Plaxis 8 nevű véges elemes szoftverrel. A számításokat két – egy 10 m és egy 15 m magas – rézsűn futattuk le különböző hajlásszögeket használva. A kapott biztonsági tényezők alapján megállapítható, hogy a kétféle pernye, amely gyakorlatilag két eltérő rétegnek tekinthető a gáttesten belül, biztonsági tényezője között kétszeres különbség mutatkozik.



6. ábra. Pernye (bal oldal) és kiscelli agyag (jobb oldal) törésképe

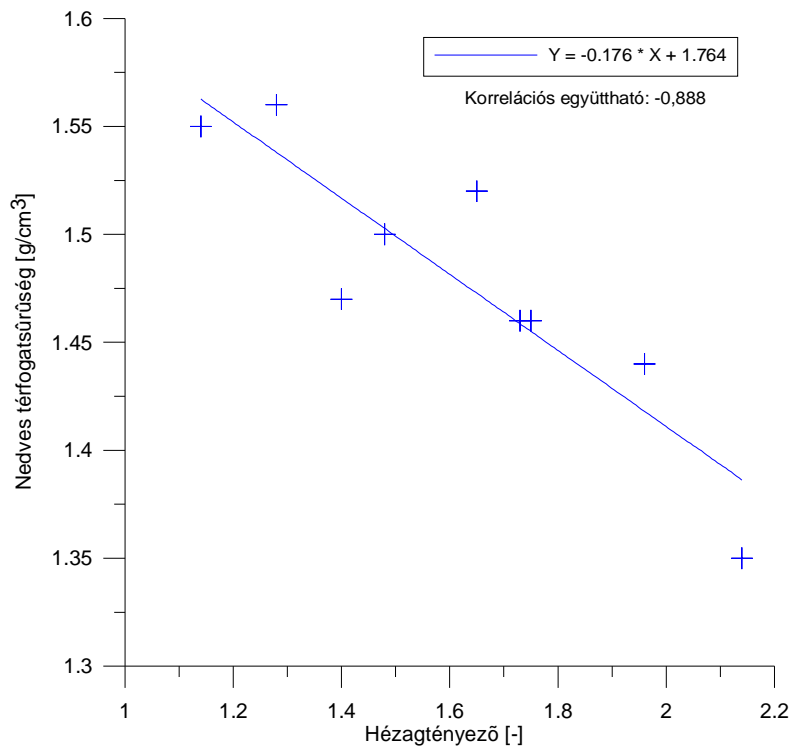
4 FÁZIS ÖSSZETÉTELI VIZSGÁLATOK

Szilárdsági vizsgálatok mellett fázis összetételi méréseket is végeztünk. A már említett víztartalom mérés mellett meghatároztuk a próbatestek nedves térfogatsűrűségét, amely átlagosan $1,45 \text{ g/cm}^3$ lett. Ezt a viszonylag alacsony értéket a tagolt felület, illetve a pernyében szabad szemmel nem látható, de mikroszkopikusan jól kimutatható lég- és gáz zárványok okozzák. A víztartalom függvényében vizsgálva a nedves térfogatsűrűséget, megállapítható, hogy a magas víztartalommal rendelkező minták átlagosan egy tizeddel kisebb térfogatsűrűséggel ($1,39 \text{ g/cm}^3$) rendelkeznek, mint az alacsonyabb víztartalommal rendelkezők ($1,49 \text{ g/cm}^3$) (7. ábra). 10 minta esetében továbbá az anyagsűrűséget is megmértük, amely eredmények átlaga $\rho_s = 2,37 \text{ g/cm}^3$ lett. Mindkét említett sűrűségi érték alatta marad a homokoknál és agyagoknál megfigyelhető értékeknek.

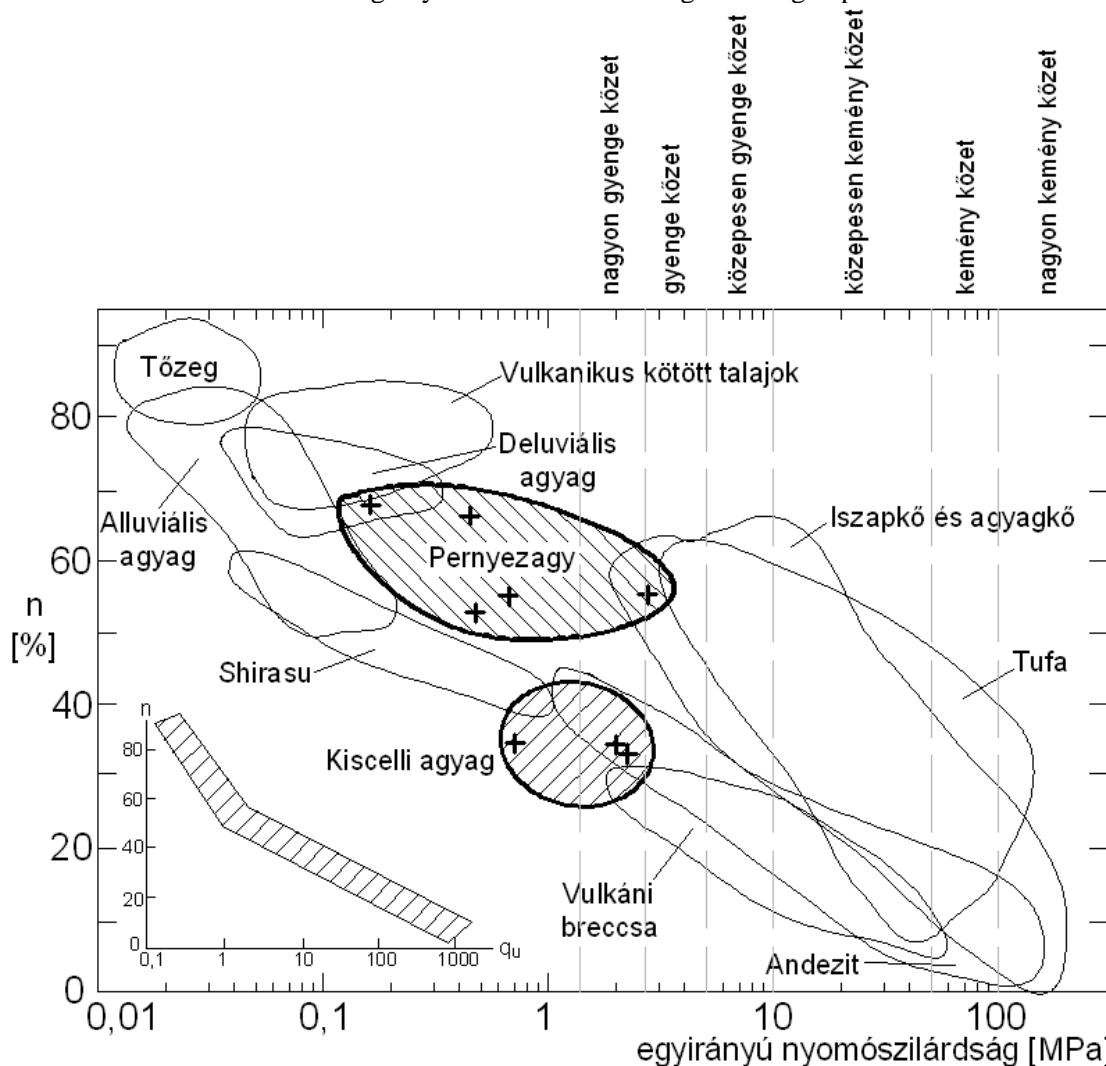
A felsorolt 2 paraméterből illetve a víztartalomból a többi talajfizikai adat is kiszámíthatóvá vált (fázisösszetétel, száraz és telített térfogatsűrűség, hézagtérfogó, telítettség). A különböző agyagokkal összevetve jelentős eltérés tapasztalható a hézagtérfogó (e) értékében is. A szürke és a sárga kiscelli agyag átlagos hézagtérfogója 0,54 és 0,62 (Paál 1974), ezzel szemben a pernyezagy átlagos értéke – 1,58 – kétszerese, illetve háromszorosa az agyagoknál tapasztaltnál. A piknométeres vizsgálatok főleg az alacsonyabb víztartalmú mintákból készültek, így ez az átlagérték nem tartalmazza a magas víztartalmú, és ezáltal magas hézagtérfogójú minták értékeit. Ezt a laza szerkezet és a már említett tagolt felület okozza. A hézagtérfogó és a nedves térfogatsűrűség kapcsolatát a 7. ábra mutatja be.

A víztartalom csökkentésére és ezáltal a szilárdság növelésére két lehetőség nyílhat. Egyrészt ha megakadályozzuk, hogy a gáttest anyaga telítődjön vízzel. Ez a tározóképzés technológiájából adódóan műszaki szempontból nehezen kivitelezhető. Másik lehetőség a hézagtérfogó csökkentése, ami az anyag gondos tömörítésével érhető el.

A hézagtérfogó és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolatot Ogawa (1986) vizsgálta. Eredményei alapján a vizsgált talajok és kőzetek többsége egy jól körülhatárolható zónába tartozik, ahol a hézagtérfogó növekedésével csökken a szilárdság. Ebbe a zónába beilleszkedik a megszilárdult pernyezagy is. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy a hasonló hézagtérfogattal rendelkező agyagok kisebb szilárdsággal rendelkeznek, mint a pernyezagy (8. ábra). Az általunk is vizsgált, hasonló szilárdságú szürke kiscelli agyag még ennél is jóval kisebb hézagtérfogattal rendelkezik.



7. ábra. A hézagtényező és a nedves térfogatsűrűség kapcsolata



8. ábra. A hézagterfogat és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat Ogawa (1986) alapján, kiegészítve a Hawkins és Pinches (1992) által meghatározott kőzetosztályozás intervallumaival

5 ÖSSZEGRÖZÉS

A széntüzelésű erőművekben keletkező pernyezagy az egyik legleterjedtebb energiaipari melléktermék, mivel a szén évszázadok óta az egyik legfontosabb energiahordozónak számít. A pernyezagy tulajdonságait döntő mértékben befolyásolja a kiindulási anyag szabad mésztartalma. Minél magasabb a pernye szabad CaO tartalma, annál nagyobb hidraulikus kötőképesség jellemzi, így a megszilárdult anyag annál nagyobb kohézióval fog rendelkezni. Ez a tulajdonság azt eredményezi, hogy az ilyen típusú a pernyék alkalmasak zagy tározók építésére.

A nyomó- és húzószilárdsági vizsgálatok eredményeit jelentősen befolyásolta a megszilárdult pernyezagy réteges, heterogén szerkezete, amely a zagyolt gátépítés technológiájára és az alkalmazott tüzelőanyag változására vezethető vissza. A kapott eredmények alapján a megszilárdult pernyezagy szilárdsága a puha kőzetekkel, illetve kemény talajokkal mutat rokonságot.

A porozitás és a szilárdság között egyértelmű összefüggés mutatkozott, minél nagyobb volt a minta porozitása, annál kisebb lett a szilárdság értéke. A víztartalom és a σ - ϵ ábrák alapján két csoportra lehetett bontani a mintákat. A kétféle pernyezagy konzisztenciája miatt, csak a Mohr-Coulomb törési feltétel segítségével lehetett meghatározni a nyírószilárdsági paramétereket, közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatokra alkalmas próbatesteket nem lehetett kialakítani belőlük. Ezen paramétereket alkalmazva a Plaxis szoftver segítségével elkészült állékonysági számítások alapján a kétféle anyag – ami a gáttest két különböző rétegének tekinthető – biztonsági tényezője között kétszeres különbség adódott.

A tömeg összetételi vizsgálatok szerint a megszilárdult zagy magas hézagtenyezővel és alacsony nedves térfogatsűrűséggel rendelkezik. Ezeket a tulajdonságokat a pernye tagolt felülete és a szemcsék belsejében található apró lég- és gázzárványok okozzák.

A kísérletek során a pernyezagy, illetve a zagyok viselkedésének csak egy kis szeletét elemeztük. Számtalan további vizsgálat szükséges ahhoz, hogy ezeket az anyagokat jobban megismerjük, és elkerülhetők legyenek az ajkaihoz hasonló katasztrófák.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk Kőszegi Lászlónak, Görög Péternek akik észrevételeikkel és javaslataikkal segítették a cikk megírását, továbbá Rózsa Lászlónak a laborvizsgálatok során nyújtott segítségéért.

IRODALMJEGYZÉK

- Görög P. 2006. A „puha” kőzet és „kemény” talaj problematikájának bemutatása a budai márga vizsgálata alapján. In: Török Á, Vásárhelyi B. (szerk.) *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 59-72.
- Görög P. 2007a. Engineering geologic properties of the Oligocene Kiscell Clay. *Central European Geology*, **50**(4), 313-329.
- Görög P. 2007b. Characterization and the mechanical properties of the eocene buda marl. *Central European Geology* **50**(4) 241-258.
- Hawkins A. B. & Pinches G. M. 1992. Engineering descriptions of mudrocks, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **25**, 17-30
- Kopecskó K. Kleb B. 1997. *A Tatabányai/Bánhidai Erőmű pernyéjéből előállított sűrűzagy ásványi összetételének vizsgálata ipari hulladék minősítés céljából*, BME Mérnökgeológiai Tanszék, Budapest
- Magyar Szabvány, 2008. *MSZ EN 1997-2, Eurocode 7, Geotechnikai tervezés*, 2. rész: Geotechnikai vizsgálatok
- Nagy L. 2011. Zagyátek biztonsága: El ne öntsön a mérge, *Mérnök Újság*, **18** (1), 16-17
- Ogawa Y. 1986. *Geology – Ishikawa*, Ishigawa Soil Investigators Incorporated Association, **40**, 22-23.
- Paál T. 1974. Talajfizikai jellemzők vizsgálata, *Mélyépítéstudományi Szemle*, **24** (8), 379-387.